

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**Otimização do transporte público visando a integração entre zonas central e sul
de Porto Alegre utilizando o software de simulação SUMO**

por

Danton de Moraes Ayres Moura

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, setembro 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

Otimização do transporte público visando a integração entre zonas central e sul de Porto Alegre utilizando o software de simulação SUMO

por

Danton de Moraes Ayres Moura

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE
DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Farenzena

Banca examinadora:

Prof. Dra. Helena Beatriz Bettella Cybis – DEPROT / UFRGS
Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos – DELAE / UFRGS
Prof. Dr. Marcelo Escobar Aragão – PPGSPA / FURG

Porto Alegre, 7, outubro de 2022.

RESUMO

A sustentabilidade da mobilidade urbana é um dos aspectos de maior relevância na luta contra as alterações climáticas e da qualidade de vida em grandes metrópoles. O Brasil é uma economia emergente e possui algumas cidades com grandes populações urbanas. Uma vez que a maioria dessas cidades cresceu de forma descontrolada, o transporte é extremamente complexo e privilegia meios individuais em detrimento dos meios coletivos, o que se opõe aos objetivos do desenvolvimento sustentável. No planejamento do transporte público, a questão da otimização de rotas é muito importante para a sua eficiência e é crucial para a sua atratividade. Neste trabalho, o objetivo é de definir o horário de partida e a quantidade de veículos de uma linha BRT de forma a minimizar as emissões de CO₂, respeitando a condição imposta pelo número de passageiros a serem transportados. Para realizar a simulação, foi utilizada a ferramenta SUMO (*Simulation of Urban Mobility*), integrada com o *Java OpenStreetMap Editor* para a geração dos mapas da malha rodoviária, a linguagem de programação Python para o desenvolvimento do cenário de otimização e a biblioteca TraCI (*Traffic Control Interface*) para a integração entre Python e SUMO. A partir de Python implementou-se o algoritmo de otimização Nelder-Mead. A metodologia desenvolvida foi coerente, porém a redução de emissões de CO₂ obtida foi de apenas 7%. O que pode significar que esse tipo de abordagem não gera tanto impacto, e que reduções mais significativas seriam obtidas em caso de mudança de tecnologia de motorização dos veículos e/ou na migração de usuários de veículos individuais para o transporte público, com a melhoria da atratividade do modal.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade, Mobilidade Urbana, Otimização, Redução de Emissões de Gases.

DE MORAES, D. **Optimization of public transportation aiming at the integration between central and southern areas of Porto Alegre using SUMO simulation software**. 2022. 37. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Ano.

ABSTRACT

The sustainability of urban mobility is one of the most relevant aspects in the fight against climate change and the quality of life in large metropolises. Brazil is an emerging economy and has some cities with large urban populations. Since most of these cities have grown in an uncontrolled way, transportation is extremely complex and privileges individual means of transport to the detriment of collective means, which is opposed to the objectives of sustainable development. In public transport planning, the issue of route optimization is very important for its efficiency and is crucial for its attractiveness. In this work, the goal is to define the departure time and the number of vehicles of a BRT line to minimize CO₂ emissions, respecting the condition imposed by the number of passengers to be transported. To perform the simulation, the simulator SUMO (Simulation of Urban Mobility) was used, integrated with the Java OpenStreetMap Editor for the generation of the road network maps, the Python programming language for the development of the optimization scenario and the TraCI (Traffic Control Interface) library for the integration between Python and SUMO. From Python the Nelder-Mead optimization algorithm was implemented. The methodology developed was consistent, but the CO₂ emission reduction obtained was only 7%. This may mean that this type of approach does not generate as much impact, and that more significant reductions would be obtained in the case of a change in vehicle motorization technology and/or the migration of users from individual vehicles to public transportation, improving the attractiveness of the modal.

KEYWORDS: Sustainability, Urban Mobility, Optimization, CO₂ Emission Reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da frente de Pareto para um problema de otimização biobjetivo, tanto no caso de maximização como de minimização de f_1 e f_2 .	10
Figura 2: Etapas do Trabalho.....	16
Figura 3: Parte do desenho do Projeto do BRT de Porto Alegre.....	16
Figura 4: Configuração da simulação do SUMO	18
Figura 5: Ilustração de composição de uma rede, ilustrando: nós, vias e conexões.....	18
Figura 6: Exemplo de arquivo "xml" que define a rede.....	18
Figura 7: Exemplo de arquivo "xml" que define as rotas.....	19
Figura 8: Estrutura da simulação no SUMO	19
Figura 9: Captura do osmWebWizard.py	20
Figura 10: Captura do sumo-gui em execução com informações de rede e rotas baixadas automaticamente pelo OSM WebWizard.....	20
Figura 11: Esquema Python, TraCI, SUMO.....	20
Figura 12: Exemplo de código do controle do SUMO no Python, através de TraCI	21
Figura 13: Rede de tráfego, obtida através do OSM Web Wizard	22
Figura 14: Esquema ilustrativo das linhas de ônibus analisadas	23
Figura 15: Esquema ilustrativo das linhas, e simulação no SUMO.....	23
Figura 16: Ilustração dos locais de partida de pessoas e de ônibus e embarque de passageiros	25
Figura 17: Esquema da metodologia empregada.....	26
Figura 18: Simulação do caso real no SUMO (ônibus em amarelo e local de partida em vermelho)	27
.....	27
Figura 19: Tempo médio de espera em cada linha e a ocupação média dos ônibus.....	27
Figura 20: Ocupação e Emissões antes da implementação dos fatores de emissão e.....	28
Figura 21: Simulação do cenário proposto no SUMO.....	28
Figura 22: Distribuição horária dos ônibus comparada com a da demanda.....	29
Figura 23: Serviços tronco-alimentadores e serviços diretos	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Simuladores de tráfego	13
Quadro 2: Simuladores de tráfego gratuitos e de código aberto.....	13
Quadro 3: Modelos de emissão	14
Quadro 4: Demanda diária de cada linha entre 16h e 20h.....	17
Quadro 5: Número de ônibus	17
Quadro 6: Fatores de correção de acordo com a taxa de ocupação dos 3 tipos de ônibus utilizados neste trabalho.....	22
Quadro 7: Demanda horária de passageiros	25
Quadro 8: Tabela de horários inicial, conjunto de $x \in \mathbb{R}^n$ utilizados no algoritmo Nelder-Mead.....	25
Quadro 9: Resultados dos cenários.....	29
Quadro 10: Disposição temporal dos ônibus	29
Quadro 11: Comparação entre todos os cenários simulados	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	CONTEXTO	7
1.2	JUSTIFICATIVA	7
1.3	OBJETIVOS.....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Planejamento do transporte público urbano	9
2.1.1	Caracterização de um problema de otimização multiobjetivo.....	9
2.1.2	Abordagens de solução de problemas multiobjetivos	10
2.2	Simuladores de Tráfego.....	13
2.3	Modelos de Emissões	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	Definição do Escopo	16
3.2	Levantamento de Dados	17
3.3	Características gerais da simulação de redes de tráfego no SUMO	17
3.4	Estrutura geral da interligação entre SUMO e Python	20
3.5	Cenários de simulação.....	21
3.5.1	Hipóteses Gerais.....	21
3.5.2	Cenário de Base.....	22
3.5.3	Cenário Proposto	23
4	RESULTADOS	27
4.1	Cenário de base	27
4.2	Recursos computacionais e desempenho do algoritmo	28
4.3	Cenário Proposto	28
4.4	Comparação com o cenário de base	30
5	CONCLUSÃO	31
	ANEXO A - MAPA DE FISCALIZAÇÃO – DEMANDA DE PASSAGEIROS.....	35
	ANEXO B – TABELA DE HORÁRIOS DAS LINHAS DE ÔNIBUS	36
	ANEXO C – INFORMAÇÕES SOBRE BRT	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O setor de transportes é responsável por um quarto das emissões mundiais de gases de efeito estufa (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2015) e é uma das principais causas da má qualidade do ar nas cidades, representando uma séria ameaça à saúde pública. O transporte rodoviário é responsável por 14% do total de emissões de CO₂ equivalente do Brasil e 91% das emissões do setor de transportes (BRASIL, 2020). Estima-se ainda que, devido ao alto nível de poluição nas grandes cidades brasileiras, o risco de ataque cardíaco é aumentado em 75% em comparação com as cidades com ar limpo (OLMO *et al.*, 2011). É neste contexto que nasceu o conceito de planejamento da mobilidade urbana sustentável (do inglês SUMP, *Sustainable Urban Mobility Planning*) (SINGH *et al.*, 2022).

1.2 JUSTIFICATIVA

A mobilidade urbana é um dos aspectos mais importantes quando se fala da função social de uma cidade, e através dela é possível garantir o acesso a outras funções e setores, tais como serviços, lazer etc. O tema inclusive consta na lista dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), um apelo global estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) que visa acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade. A mobilidade urbana está contida no décimo primeiro ODS, nomeado “Cidades e Comunidades Sustentáveis”, que em linhas gerais se concentra em proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível a todos. Ao qual o Brasil se comprometeu em agir, principalmente, no que tange à priorização do transporte público de massa (IPEA, 2019).

A realidade da mobilidade urbana em países em desenvolvimento como o Brasil, no entanto, necessita de muitos avanços. Conforme consta no relatório da Agência Nacional de Transportes Públicos de 2018 (publicado em 2020), entre 2014 e 2018 verificou-se um aumento de 11% no uso do transporte individual por habitante, enquanto o uso do transporte coletivo e não motorizado diminuiu em 3%. Além da queda do número de passageiros do transporte público, o custo crescente da operação do sistema, resulta eventualmente no aumento das tarifas. Por sua vez, as altas tarifas praticadas têm se aproximado às do transporte por aplicativo para viagens curtas, que pode ser um dos fatores que contribuem para a queda de demanda do transporte coletivo. Esse cenário se opõe a luta contra o aquecimento global e ao engajamento do país com relação aos ODS (SIMOB/ANTP, 2020).

A cidade de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul, se insere nesse contexto, com uma redução progressiva no número de passageiros transportados por ônibus, totalizando uma queda de 23% entre 2014 e 2019. Essa queda já é tendência há mais de uma década, porém ficou mais evidente em épocas de pandemia da COVID-19 (EPTC, 2022). A tarifa do transporte por ônibus de Porto Alegre em 2022 foi fixada em R\$4,80, onde com o novo método de cálculo (por quilometragem rodada) o município irá subsidiar uma parte do custo da operação, ou seja, irá complementar o percentual que não for coberto pelo pagamento da tarifa (PORTO ALEGRE, 2021). Entretanto, esse tipo de política de subsídio não precisa ser limitada a situações pontuais. Na Europa por exemplo, os subsídios para os sistemas de transporte público - ônibus, metrô e trens – podem chegar a até 80% (EMTA, 2022). Esse aspecto não somente possibilitaria um preço acessível a todos, mas também a implantação de projetos de expansão e melhorias em prol de um transporte coletivo sustentável.

Visando a Copa do Mundo de 2014, muitas obras e melhorias foram consideradas, e no âmbito da Mobilidade Urbana, uma delas foi o Projeto dos Portais da Cidade de Porto Alegre, um sistema BRT (do inglês, *Bus Rapid Transit*) que seria complementado por terminais de intercâmbio e estruturas especiais, tais como túneis e viadutos. Finalmente, o projeto foi abandonado, embora pudesse ter trazido uma melhoria significativa na forma de se deslocar dos porto-alegrenses e uma redução na poluição do ar local e nas emissões de CO₂ decorrentes do transporte urbano. A avaliação da redução de emissões de um sistema BRT deve levar em conta todo o redesenho da rede de transporte público. Porém, análises reduzidas podem

dar uma noção do impacto do BRT, notadamente, no transporte de passageiros entre dois pontos de concentração de demanda, a partir de linhas troncais. Nesse sentido, a simulação computacional de ambientes experimentais artificiais pode ser auxiliar na tomada de decisões sobre projetos reais para provar ou refutar sua viabilidade (PANOVSKI, 2020).

1.3 OBJETIVOS

Conforme elucidado é crucial a melhoria da eficiência do transporte de massa para que se possa alcançar o desenvolvimento sustentável, tanto local quanto globalmente. O objetivo principal deste trabalho é definir o horário de partida e a quantidade de veículos de uma linha BRT de forma a minimizar as emissões de CO₂, respeitando a condição imposta pelo número de passageiros a serem transportados. Então, visando-se atingir o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos são requeridos:

- Simulação das linhas de ônibus por meio do simulador de tráfego SUMO;
- Controle da simulação através da linguagem de programação Python, utilizando a biblioteca TraCI (*Traffic Control Interface*);
- Desenvolvimento e implementação de uma metodologia de otimização, utilizando o algoritmo Nelder-Mead.

O estudo será estruturado em 5 capítulos. No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica dos tópicos discutidos ao longo do trabalho sobre algoritmos de otimização e redes de tráfego. No Capítulo 3, são apresentadas as metodologias para o desenvolvimento da ferramenta proposta. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos no caso de estudo do BRT de Porto Alegre. Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas conclusões a respeito dos resultados observados e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é destinado à apresentação dos aspectos e o estado do problema tratado ao longo deste trabalho. Começando pela formulação do problema do planejamento da mobilidade urbana, passando por uma breve apresentação referente a métodos de otimização multiobjetivo e uma contextualização da otimização de rotas. Em seguida são apresentados simuladores de tráfego e modelos de emissões e sua relevância para a resolução desse tipo de problema.

2.1 Planejamento do transporte público urbano

O planejamento do transporte público urbano passa pela readequação dos sistemas de transporte público às necessidades atuais da população. Nesse sentido, a otimização das rotas nesse setor é uma temática extremamente importante e complexa. Do planejamento urbano a longo prazo às operações diárias, os desafios podem parecer incontroláveis. Para os governos estaduais, locais e municipais, as comunidades são os principais clientes do trânsito público. Mas existem outras partes interessadas, como políticos, empresas operadoras, entre outros. Cada um deles tem exigências diferentes, muitas vezes conflitantes. Com tantos grupos diferentes a considerar, a otimização de rotas apresenta um desafio para agências de trânsito, departamentos de transporte e organizações de planejamento metropolitano. Seu trabalho é encontrar o melhor equilíbrio entre os interesses concorrentes para servir o maior número possível de pessoas da melhor maneira possível, configurando um típico problema de otimização multiobjetivo. Na resolução de tais problemas, algoritmos evolutivos e/ou heurísticos têm sido amplamente reconhecidos como métodos adequados. Nas diversas aplicações relativas a soluções de tráfego intermodal, esses algoritmos podem ser acoplados a simuladores de tráfego, a exemplo do simulador de código aberto SUMO (BEHRISCH; KRAJZEWICZ; WEBER, 2014; LOPEZ *et al.*, 2018; NGUYEN *et al.*, 2021)

2.1.1 Caracterização de um problema de otimização multiobjetivo

A otimização multiobjetivo (MOO, do inglês *Multiobjective Optimization*) consiste em encontrar um conjunto de soluções aceitáveis para que os tomadores de decisão possam decidir dentre elas qual a mais conveniente. O problema geral de MOO que requer a otimização de N objetivos pode ser formulado da seguinte forma (NGATCHOU; ZAREI; EL-SHARKAWI, 2006):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } \vec{y} &= \vec{F}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_N(\vec{x})]^T, \\ \text{Sujeito a } g_j(\vec{x}) &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, M \\ \text{Onde } \vec{x} &= [x_1, x_2, \dots, x_P]^T \in \Omega \end{aligned} \quad (2.1)$$

sendo \vec{y} o vetor objetivo, g_j representa as restrições e \vec{x} o vetor de dimensão P representando variáveis de decisão pertencentes a um espaço de parâmetros Ω . O espaço abrangido pelos vetores objetivos é chamado de espaço objetivo. O subespaço dos vetores objetivos que satisfazem as restrições é chamado de espaço viável. A solução utópica é a solução ideal para todos os objetivos (3.2) (NGATCHOU; ZAREI; EL-SHARKAWI, 2006).

$$\begin{aligned} \vec{x}_0 \in \Omega : \forall \vec{x} \in \Omega, f_i(\vec{x}_0) &\leq f_i(\vec{x}), \\ \text{para } i &\in \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned} \quad (2.2)$$

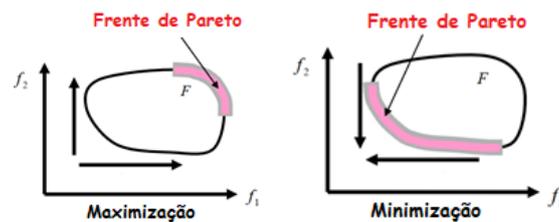
Para $n = 1$, o problema MOO é reduzido a um problema de simples objetivo (SOO). Nesse caso, a solução utópica é simplesmente a solução ótima. Para o caso mais geral onde $n > 1$, entretanto, a solução ótima utópica geralmente não existe, já que as funções objetivo individuais $\{f_1\}$ são tipicamente conflitantes. Em vez disso, existe um conjunto possivelmente incontável de soluções não dominadas que representam diferentes compromissos entre os objetivos, para as quais um objetivo não pode ser melhorado sem a degradação de qualquer objetivo, configurando o conjunto de Pareto. Os conceitos de dominância de Pareto e otimização de Pareto são comumente usados para comparar soluções em otimização multiobjetivo (COELLO COELLO; LAMONT; VAN VELDHUIZEN, 2007).

Formalmente, o vetor de decisão $\vec{u} = [u_1, u_2, \dots, u_p]^T$ Pareto domina $\vec{v} = [v_1, v_2, \dots, v_p]^T$, em um contexto de minimização, se e somente se,

$$\begin{aligned} \forall i \in \{1, \dots, N\}, f_i(\vec{u}) &\leq f_i(\vec{v}), \\ \text{e } \exists j \in \{1, \dots, N\}: f_j(\vec{u}) &< f_j(\vec{v}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

No contexto da otimização MO, a dominância de Pareto é usada para comparar e classificar os vetores de decisão: \vec{u} domina \vec{v} no sentido de Pareto significa que $\vec{F}(\vec{u})$ é melhor do que $\vec{F}(\vec{v})$ para todos os objetivos, e há pelo menos uma função objetivo para a qual $\vec{F}(\vec{u})$ é estritamente melhor do que $\vec{F}(\vec{v})$. Logo, diz-se que uma solução \vec{a} é a Pareto ideal, se e somente se, nenhuma outra solução a dominar. Em outras palavras, a solução \vec{a} não pode ser melhorada em um dos objetivos sem afetar negativamente pelo menos um outro objetivo. O vetor objetivo $\vec{F}(\vec{a})$ correspondente é chamado de vetor dominante de Pareto, ou vetor não-inferior ou não-dominado. O conjunto de todas as soluções ótimas de Pareto é chamado de conjunto ótimo de Pareto. Diz-se que os vetores objetivos correspondentes estão na frente de Pareto. É geralmente impossível chegar a uma expressão analítica para a frente de Pareto (NGATCHOU; ZAREI; EL-SHARKAWI, 2006).

Figura 1: Ilustração da frente de Pareto para um problema de otimização biobjetivo, tanto no caso de maximização como de minimização de f_1 e f_2 .



Fonte: Adaptado de (NGATCHOU; ZAREI; EL-SHARKAWI, 2006).

2.1.2 Abordagens de solução de problemas multiobjetivos

Existem vários métodos conhecidos para resolver problemas de MOO. As abordagens clássicas consistem em converter o problema MOO em um problema de otimização simples objetivo (SOO, do inglês *Single-Objective Optimization*), que pode então ser resolvido usando técnicas tradicionais de otimização escalar. A maioria dessas abordagens assume a priori informações fornecidas pelas partes envolvidas e tomadores de decisão (seja uma classificação de objetivos em ordem de importância ou a indicação de valores-alvo ideais), buscando encontrar uma única solução, que melhor satisfaz essas preferências fornecidas. A segunda classe de técnicas cresceu nos últimos anos graças aos avanços computacionais e essas técnicas são orientadas para a determinação direta da frente de Pareto através da otimização de todos os objetivos separadamente (NGATCHOU; ZAREI; EL-SHARKAWI, 2006).

- **Métodos Clássicos**

A seguir apresenta-se uma síntese dos principais métodos clássicos.

⇒ **Agregação Ponderada**

O método de agregação ponderada é um caso especial do método da função de utilidade, ou seja, uma combinação linear de objetivos, que converte o problema de MO em um problema de SO, aplicando um operador funcional ao vetor objetivo. (CALVO; MESIAR; YAGER, 2004).

⇒ **Programação por metas**

Uma variante da agregação ponderada é a programação por metas, a qual procura minimizar os desvios de alvos previamente especificados. (prioridades e metas) (ROMERO, 2004).

⇒ **ε -Constraint**

Este é um método formulado para descobrir soluções ótimas de Pareto baseadas na otimização de um objetivo, enquanto tratando os outros objetivos como limitações vinculadas por algumas faixas permissíveis ε_i . (COELLO COELLO, 1999).

⇒ **Nelder-Mead**

O algoritmo de Nelder-Mead é um dos mais populares métodos livre de derivadas, sendo capaz de encontrar mínimos em funções que não possuem derivadas contínuas. Muitas vezes, a otimização é relacionada com a derivada da função igualada a zero. No entanto, existem várias funções sem derivadas, ou com derivadas complicadas, que também podem ser otimizadas, e os métodos livres de derivação podem ser justamente utilizados na resolução desse tipo de problemas (CONN; SCHEINBERG; VICENTE, 2009). O algoritmo é adequado à resolução de Problemas Irrestritos de Programação Não Linear que podem ser definidos por

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{sujeito a } x \in \mathbb{R}^n, \end{aligned} \tag{2.4}$$

em que $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Como $x \in \mathbb{R}^n$, temos que não há restrições no conjunto estudado. Ao contrário de outros algoritmos de otimização multiobjetivo baseados em métodos clássicos, não requer nenhum conhecimento a priori do problema, nem precisa de pesos predefinidos ou restrições adicionais, pois funciona sem escalonar o problema multiobjetivo. Ele é amplamente utilizado na engenharia e é provavelmente o mais citado, e entre as razões para este sucesso estão a simplicidade e a facilidade de adaptação às funções de minimização ou maximização. O algoritmo trabalha com uma população de pontos e é capaz de gerar uma multiplicidade de soluções ótimas de Pareto (MEHTA; DASGUPTA, 2020; NELDER; MEAD, 1965).

- **Métodos Baseados em Inteligência Computacional**

Em contraste com as técnicas baseadas na agregação, algumas técnicas "inteligentes" são orientadas para a geração direta da frente de Pareto, otimizando simultaneamente os objetivos individuais. Os avanços computacionais e o desenvolvimento de algoritmos metaheurísticos baseados na população contribuíram para o surgimento destes métodos nos últimos anos. Os algoritmos baseados na população têm a vantagem de avaliar várias soluções potenciais em uma única iteração (ZITZLER; DEB; THIELE, 2000).

A computação evolutiva emula o processo de evolução biológica, ou seja, uma população de indivíduos representando diferentes soluções evolui para encontrar as melhores soluções. Técnicas evolutivas têm sido aplicadas com sucesso a todos os tipos de otimização de sistemas operacionais, especialmente aqueles onde funções objetivas não se comportam bem (não diferenciáveis, descontínuas e/ou sem formulação analítica) (COELLO COELLO; LAMONT; VAN VELDHUIZEN, 2007; ZITZLER; DEB; THIELE, 2000).

⇒ **Abordagens baseadas no princípio de Pareto**

Algoritmos Evolutivos baseados no princípio de Pareto têm por ideia básica encontrar o conjunto de indivíduos não-dominados na população. O processo é então repetido com os indivíduos restantes até que toda a população seja classificada e lhes seja atribuído um valor de aptidão física. Em conjunto com a atribuição de um valor de aptidão baseado em Pareto, um mecanismo de nichos é usado para evitar que o algoritmo convirja para uma única região da frente de Pareto (COELLO COELLO, 1999).

Um método simples e eficiente é o Algoritmo Genético Multiobjetivo (MOGA). A aptidão de um determinado indivíduo é proporcional ao número de indivíduos que ele domina (FONSECA; FLEMING, 1993). Outro tipo são os Algoritmos Genéticos de Ordenação Não Dominados (NSGA), que utiliza uma técnica de classificação em camadas. A todos os indivíduos não-dominados é atribuído o mesmo valor de

aptidão e o compartilhamento é aplicado no espaço de decisão variável. O processo é repetido para o restante da população com um valor de aptidão física progressivamente menor atribuído aos indivíduos não-dominados (DEB *et al.*, 2002; SRINIVAS; DEB, 1994).

- **Otimização de rotas**

O problema de roteamento de veículos (VRP, do inglês *vehicle routing problem*) é uma otimização combinatória que envolve encontrar um projeto ideal de rotas percorridas por uma frota de veículos para atender a um conjunto de clientes. No VRP tradicional, o objetivo é detectar rotas para uma frota homogênea de veículos a fim de satisfazer as exigências dos clientes. O tema é, porém, extremamente amplo, englobando por exemplo o desenho e o planejamento de redes de transporte público. Uma breve revisão da literatura em torno do assunto é apresentada a seguir.

A combinação de simuladores de tráfego e algoritmos de otimização é bastante difundida na solução do VRP, a exemplo do arranjo entre o simulador SUMO e o algoritmo NSGA-II. Baseado neste arranjo SILVA; FINAMORE; HENRIQUES (2022) propuseram um redesenho da rede de ônibus de Lisboa a partir de dados reais da utilização do transporte público de Lisboa. A partir das simulações conseguiu-se reduzir amplamente o número de rotas, e todos os objetivos relacionados aos passageiros, incluindo tempo de viagem e transferências por viagem, melhoraram significativamente. Já SINGH *et al.* (2022) apresentaram uma abordagem considerando o problema de minimizar o ruído veicular em um determinado bairro, assim como as emissões de CO₂ na cidade, alterando as ruas permitidas aos veículos pesados. PÉRES *et al.*, 2018 concentraram-se em otimizar simultaneamente o fluxo de tráfego e as emissões veiculares através do planejamento de semáforos em áreas urbanas. Melhorias significativas nos tempos de viagem e poluição foram relatadas. Além disso, a abordagem multiobjetivo fornece aos legisladores um conjunto de alternativas a escolher, permitindo a avaliação de vários cenários e a modificação dinâmica dos ciclos de semáforos.

Uma grande subárea do VRP é a otimização do transporte público. A solução ao problema do projeto de redes ideais de rotas de ônibus (do inglês BTRNDP, *Bus Transit Route Network Design Problem*), é recorrentemente abordada em pesquisas acadêmicas e a utilização de variados métodos e tipos de algoritmos têm sido estudados. Nesse contexto, FAN; MACHEMEHL (2006) propôs um modelo multiobjetivo a partir de algoritmos genéticos, incluindo o efeito do tamanho da rota definida e da agregação da demanda e o redesenho da rede de trânsito existente.

KALLE *et al.*(2019) propuseram um novo simulador de horários para as rotas de ônibus a fim de melhorar a confiabilidade do tempo de viagem, os níveis de carga do ônibus e os avanços operacionais. Já HARTMANN TOLIĆ; NYARKO; CEDER (2020) desenvolveram um modelo baseado no algoritmo multiobjetivo de otimização de enxame de partículas (MOPSO), buscando minimizar o tempo de espera dos passageiros e a relação de ocupação dos veículos. Por sua vez, TESSITORE *et al.* (2022) realizaram um estudo análogo, porém focado na otimização de serviços de metrô, visando maior pontualidade e regularidade.

Nas operações de transporte público, os veículos tendem a se amontoar (*bunching* em inglês) devido à instabilidade da demanda de passageiros e das condições de tráfego. No sentido de resolver o problema do amontoamento dos ônibus, sem aumentar demasiadamente o tempo de espera GKIOTSALITI (2020) e KOPPISETTI; KAVITHA; AYESTA (2018) desenvolveram métodos baseados em algoritmos evolutivos a fim de obter tabelas de horários ideais.

CHEN (2014) projetou um algoritmo de otimização global usando programação dinâmica, visando atender a demanda em tempo real e, concluiu que significativas economias aos operadores de transporte público podem ser alcançadas. SUN *et al.* (2021) e MO *et al.* (2020) também apresentaram modelos focados em reorganizar a frequência de ônibus a fim de atender à variabilidade da demanda em tempo real.

Em alguns casos, a utilização do algoritmo de otimização Nelder-Mead, pode ser vantajosa, principalmente, pois o método pode ser aplicado a uma função contínua sem a necessidade de avaliação de suas derivadas. SPILIOPOULOU *et al.* (2015) empregaram Nelder-Mead a fim de calibrar o modelo METANET para um trecho particular de via rápida utilizando dados reais de tráfego. Já ORLANDO *et al.*,

(2021) aplicaram o método ao problema da estimativa da demanda para as redes de transporte público, a fim de encontrar uma alternativa à matriz origem-destino, uma pesquisa cara e às vezes inacessível.

Como pode-se observar a utilização de métodos e algoritmos de otimização é cada vez mais presente na resolução dos mais variados problemas envolvendo transportes.

2.2 Simuladores de Tráfego

A simulação de tráfego pode ser definida como o modelo matemático de sistemas de transporte, implementado através da aplicação de um software dedicado. Há duas categorias principais de abordagens de simulação de tráfego: macroscópica e microscópica. Enquanto um simulador de tráfego microscópico se concentra na mobilidade de cada entidade individual do sistema, um simulador de tráfego macroscópico fornece uma visão completa do sistema levando em conta restrições mais globais, tais como densidade de tráfego geral e distribuição de veículos (PANOVSKI, 2020). A partir do Quadro 1, pode-se ter um panorama dos simuladores de tráfego mais utilizados.

Quadro 1: Simuladores de tráfego

Simuladores de Tráfego	
Software de código aberto	SUMO
	MATSIM
	MAINSIM
Software comercial	QUADSTONE PARAMICS
	VISSUM
	CUBE
	VISSIM
	AIMSUN
	SATURN

Fonte: Adaptado de (PANOVSKI, 2020)

Em se tratando de softwares comerciais algumas vantagens são o suporte em tempo real, as interfaces gráficas aprimoradas do usuário, entre outras. Porém, a aquisição desses softwares pode ser onerosa, limitando a utilização deles por parte da academia e de desenvolvedores individuais. Daí o porquê da ampla difusão de softwares gratuitos e de código aberto. Alguns dos mais utilizados e suas características gerais podem ser observadas a partir do Quadro 2.

Quadro 2: Simuladores de tráfego gratuitos e de código aberto

Software	Abordagem Geral	Características Gerais
MATSim	Macroscópica	Poderosa plataforma de simulação de tráfego em cenários de grande escala, no caso de grandes cidades ou mesmo países. Essa abordagem global não é adaptada ao uso em cenários microscópicos (HULTÉN, 2019).
MAINSIM	Microscópica	Esse simulador de tráfego gera gráficos de simulação a partir de material cartográfico de forma totalmente automática e é capaz de simular cidades inteiras com veículos, bicicletas e pedestres. A exclusão dos meios de transporte público e a pouca disponibilidade de documentação on-line limitam sua utilização (DALLMEYER; TIMM, 2012).
SUMO	Microscópica	O SUMO permite a simulação de um determinado tráfego sob demanda, que consiste em um conjunto de veículos individuais que se movimentam através de uma determinada rede rodoviária. A simulação permite abordar um grande conjunto de tópicos de gerenciamento de tráfego e é puramente microscópica: cada veículo é modelado explicitamente, tem uma rota própria e se move individualmente através da rede (PANOVSKI, 2020).

Fonte: Adaptado de (PANOVSKI, 2020)

Dentre os citados no Quadro 2, o SUMO é o simulador de tráfego mais utilizado da academia, pois é capaz de simular uma grande variedade de cenários. Essa plataforma é capaz de simular com sucesso

tanto cenários pequenos quanto em larga escala, além de simular o transporte público, ao mesmo tempo que tem uma boa e compreensível documentação e suporte técnico gratuitos.

2.3 Modelos de Emissões

Fatores de emissões de gases do efeito estufa (GEE) genéricos são importantes para a conscientização de todos os participantes da cadeia de transporte sobre seu impacto a nível macroscópico, e ajudá-los a direcionar melhor suas escolhas, onde aplicáveis, para soluções menos emissoras a níveis macroscópicos. Em termos gerais, a estimativa das emissões relacionadas ao transporte pode ser baseada na equação $E = e \cdot a$, onde E é a quantidade de emissão, e é a taxa de emissão por unidade de atividade (ou fator de emissão), e a é a quantidade de atividade de transporte. A maioria dessas taxas de emissões do são baseadas na velocidade média dos veículos. No entanto, isso muitas vezes não é suficiente para caracterizar o nível de emissão do comportamento real de direção, já que diferentes situações de direção com dinâmicas e emissões diferentes podem ter mais ou menos a mesma velocidade média (JOURMARD, 1999; QUAASSDORFF *et al.*, 2022).

De forma geral, cada veículo tem um comportamento individual de emissão. Mas ao investigar o tráfego rodoviário, muitos veículos de diferentes tipos têm que ser considerados. Assim, é necessário realizar escolhas entre a quantidade de classes de emissão de veículos que um modelo cobre e os detalhes na modelagem de cada veículo ou classe de emissão. A literatura distingue as seguintes classes principais de modelos de emissão (KRAJZEWICZ *et al.*, 2015):

- **modelos de emissão do tipo inventário** que incluem dados para a maioria das classes de emissão de veículos; seus dados de entrada geralmente incluem uma composição da população de veículos e a distância percorrida, e possivelmente uma velocidade média ou um estado de tráfego abstrato.

- **modelos de emissão do tipo instantâneo** que simulam emissões de um único veículo. Ao tentar modelar as emissões de um único veículo da forma mais precisa possível, esses modelos geralmente consideram um pequeno número de veículos.

Acoplar um simulador de tráfego a um modelo de emissão instantâneo permite uma análise mais detalhada de congestionamentos, a qual requer a captura eficiente da dinâmica do tráfego e seu condicionamento. Em diversos contextos esse tipo de associação tem sido realizada e os resultados são muito satisfatórios (LIORA *et al.*, 2021; VRBANIC *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2020).

COPERT, HBEFA e PHEM (ver Quadro 3), que são resultado de trabalhos realizados nos últimos vinte anos no âmbito de programas de pesquisa europeus, são ferramentas de referência para o cálculo das emissões de poluentes rodoviários. Porém dos três, somente o HBEFA é totalmente gratuito, e uma versão simplificada do PHEM, o PHEM light, pode ser obtida gratuitamente.

Quadro 3: Modelos de emissão

Modelo	Características Gerais
COPERT	O modelo é baseado em velocidades médias e, portanto, é bem adequado para a avaliação de emissões em grandes escalas espaciais e temporais. Não permite, portanto, estimar a diferença, para uma mesma velocidade, entre as quantidades de poluentes emitidas em variadas condições de fluxo e de congestionamento (LEONIDAS NTZIACHRISTOS; ZISSIS SAMARAS, 2021).
HBEFA	O modelo é baseado em fatores de emissão discretos (em g/km) para situações de tráfego pré-definidas. Assim, ao contrário do COPERT ele leva em conta as condições de tráfego, levando em conta velocidade instantânea e aceleração. Entretanto, não é ideal para a avaliação de estratégias de controle fino, pois fatores como massa do veículo, inclinação da via entre outros, não são considerados no cálculo de emissão (NOTTER; COX, 2022).
PHEM	Modelo dá a emissão instantânea (g/s) produzida por um motor em função de sua velocidade (rpm) e carga (torque). O consumo de combustível e as medições de emissões são feitas testando combinações constantes de velocidade e carga do motor (com um dinamômetro do motor). As matrizes são feitas para velocidade constante ou para velocidade acelerada/desacelerada. Nesse caso, portanto, aspectos finos que alterem o regime de funcionamento são considerados (massa, inclinação, entre outros) (HAUSBERGER; KRAJZEWICZ, 2014).

Fonte: Autor

No simulador de tráfego SUMO foi implementado um modelo baseado no banco de dados HBEFA. O modelo foi implementado extraindo os dados da HBEFA e adequando-os a uma função contínua que foi obtida simplificando a função da potência que motor do veículo deve produzir para superar a força motriz de resistência. Porém, o modelo depende apenas da velocidade e da aceleração que impede análises mais finas (KRAJZEWICZ *et al.*, 2015).

Ao estimar as emissões usando o software SUMO, visto que seu modelo de emissões considera apenas velocidade e aceleração em seus cálculos, certas calibrações podem ser feitas através de fatores de correção dependendo do estudo realizado. Por exemplo, na análise de emissões geradas por um ônibus com mais ou menos passageiros, um fator de influência média do aumento da carga no aumento de emissões geradas pode ser adicionado. De acordo com o estudo de PELKMANS; DE KEUKELEERE; LENAERS, (2001), um aumento de massa de 25% leva a um aumento no consumo de combustível (e, portanto, de emissão de CO₂) de cerca de 10% para um ônibus a GNV e 15% para um ônibus diesel. Sendo assim, o impacto da ocupação do ônibus pode ser estimada.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho apresenta uma ferramenta que visa encontrar soluções ótimas para a tabela de horários de ônibus para que o mínimo de CO₂ seja emitido, garantindo que a demanda de transporte seja atendida. Essa ferramenta foi aplicada no contexto do transporte de ônibus da região central em direção à Zona Sul de Porto Alegre. Para a realização desta análise os seguintes passos metodológicos foram estabelecidos, como mostra a Figura 2.

Figura 2: Etapas do Trabalho



Fonte: Autor

Na primeira etapa é apresentado o escopo do trabalho, ou seja, é definida a região estudada, o período do dia avaliado e as linhas de ônibus consideradas. Na segunda etapa, os dados de entrada necessários para a elaboração dos cenários são apresentados. Na etapa 3, as características gerais do simulador de tráfego SUMO. Na etapa 4, são descritos o cenário de base e o cenário proposto. Por fim, realizou-se na última etapa uma análise comparativa dos resultados, avaliando as emissões e a ocupação média dos veículos.

3.1 Definição do Escopo

Este trabalho analisa primeiramente um cenário de base ilustrando o contexto real. Em seguida, propõe-se um cenário alternativo que servirá de base para a aplicação do método de otimização. A área do estudo localiza-se entre a região central e um ponto na Zona Sul de Porto Alegre e abrange as linhas que realizam o transporte entre essas duas regiões através das Avenidas Borges de Medeiros, Padre Cacique e Icaraí. O trecho considerado na análise começa no Centro e termina no Terminal Zona Sul, o qual pode ser observado a partir da Figura 3. Esta figura é parte do desenho do Projeto Portais da Cidade apresentado pela PREFEITURA DE PORTO ALEGRE (2010).

Figura 3: Parte do desenho do Projeto do BRT de Porto Alegre.



Fonte: (PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2010)

A linha verde nessa figura representa parte do sistema BRT e a azul uma ligação entre o Portal Sul e o Terminal Zona Sul previsto inicialmente (próximo à Avenida Icaraí). Porém, segundo DE FREITAS (2012), o Terminal do BRT poderia ser deslocado para onde se localiza o Terminal Zona Sul na Figura 3. Dessa forma, o trajeto considerado para realização deste trabalho termina nesse local. Os cenários são considerados para o período entre 16 e 20h, trajeto Centro-Bairro. O cenário de base ilustra o caso atual, que engloba as linhas de ônibus diretas, as quais partem de diferentes estações no centro e percorrem, aproximadamente, o mesmo trajeto até a Avenida Icaraí (Terminal Zona Sul). Já o cenário proposto apresenta uma única linha troncal que substitui as atuais nesse trecho. Essa linha inicia no Mercado Público e segue até o mesmo Terminal. O ANEXO C – Informações sobre brt apresenta as características gerais de um sistema BRT e de linhas diretas e troncais.

3.2 Levantamento de Dados

Para a construção dos cenários, obteve-se os dados de demanda, itinerário das linhas e tipos de ônibus. Os dados de demanda foram obtidos diretamente com o engenheiro de tráfego do Consórcio Viva Sul, operador das linhas de ônibus da Zona Sul de Porto Alegre (ROCHA, 2022). Os dados obtidos referem-se ao número de passageiros em cada ônibus que circulou pela Avenida Icaraí no trajeto Bairro-Centro, no período entre 6h e 10h do dia 3 de agosto de 2022. Porém, segundo ROCHA (2022), o comportamento da demanda de cada linha é, similar nos dois períodos, invertendo o sentido. Dessa forma, esses valores foram considerados para o período analisado neste trabalho, entre 16 e 20h, e eles estão resumidos no Quadro 4 (os dados completos estão disponíveis no ANEXO A).

Quadro 4: Demanda diária de cada linha entre 16h e 20h

Linha	Nome	Passageiros a serem transportados entre 16h e 20h
110	RESTINGA NOVA TRISTEZA	960
165	COHAB	1480
168	BELEM NOVO/TRISTEZA	45
171	PONTA GROSSA	727
173	CAMAQUA	649
176	SERRARIA	98
184	JUCA BATISTA	837
188	ASSUNÇÃO	90
189	PADRE REUS	479
	Total	5365

Fonte: Adaptado de (ROCHA, 2022)

O número de ônibus que parte do centro no período analisado foi obtido por meio do site da EPTC e uma versão resumida pode ser observada no Quadro 5. A tabela de horários completa está disponível no ANEXO B.

Quadro 5: Número de ônibus

Linha	Nome	Número de ônibus entre 16h e 20h
110	RESTINGA NOVA TRISTEZA	16
165	COHAB	22
168	BELEM NOVO/TRISTEZA	4
171	PONTA GROSSA	11
173	CAMAQUA	13
176	SERRARIA	4
184	JUCA BATISTA	18
188	ASSUNÇÃO	5
189	PADRE REUS	9
	Total	102

Fonte: Adaptado de (EPTC, 2022a)

3.3 Características gerais da simulação de redes de tráfego no SUMO

O simulador de tráfego utilizado neste trabalho é o SUMO (*Simulation of Urban Mobility*). O SUMO é um simulador de tráfego multimodal microscópico que é capaz de simular diferentes tipos de dados de tráfego e pode fornecer uma boa saída visual e compreensível para testes e análises futuras. Ele

foi desenvolvido e apresentado pela primeira vez em 2001 pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR) (KRAJZEWICZ *et al.*, 2002). Todos os lançamentos e melhorias do SUMO vêm sendo feitos com o objetivo de melhorar a experiência do usuário e introduzir funcionalidades adicionais ao ambiente (KRAJZEWICZ *et al.*, 2012). Diversas funcionalidades estão disponíveis hoje, incluindo o uso de mapas externos, algoritmos de rotas mais curtas, e diferentes tipos de veículos (LOPEZ *et al.*, 2018).

A utilização do SUMO dá-se através de três arquivos básicos: o arquivo de rede (*network*, no formato “.net.xml”), o arquivo de rotas (*routes*, no formato “.rou.xml”) e o de configuração (no formato “sumocfg”) que recebe os outros dois arquivos como entrada. Além disso, arquivos adicionais podem ser incluídos a fim de acrescentar outros aspectos como objetos, demandas, entre outros. Na análise do transporte público por ônibus, ao menos mais um arquivo deve ser considerado no arquivo de configuração, o das paradas de ônibus, salvo como arquivo adicional (*additional*, no formato “.add.xml”) (LOPEZ *et al.*, 2018). A partir da Figura 4, podem-se observar as três linhas de código com os arquivos de entrada citados anteriormente.

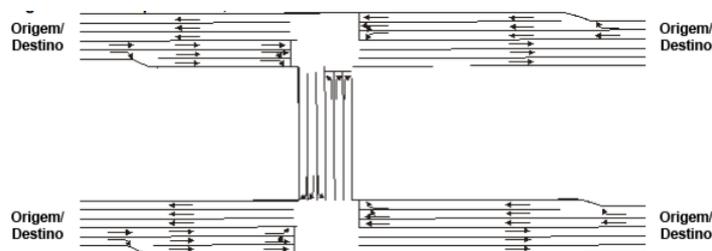
Figura 4: Configuração da simulação do SUMO

```
<input>
  <net-file value="osm.net.xml"/>
  <route-files value="osm_pt.rou.xml"/>
  <additional-files value="osm_stops.add.xml"/>
</input>
```

Fonte: Autor

A rede é o ambiente onde ocorre a simulação, a qual é composta principalmente de: nós, tipos de estradas e veículos, e conexões entre as faixas de uma estrada. Como pode ser visto no esquema da Figura 5, os nós definem os possíveis pontos de origem e/ou destino em uma rota. Essas rotas são compostas de ruas que podem ter uma ou mais pistas. O encontro entre duas ou mais ruas é realizado por interseções (ou cruzamentos).

Figura 5: Ilustração de composição de uma rede, ilustrando: nós, vias e conexões.



Fonte: (VAN HAARE HEIJMEIJER, 2016)

Na Figura 6 consta um exemplo simplificado de como o arquivo de rede (.xml) é escrito, posteriormente ele é utilizado para a inicialização da simulação no SUMO.

Figura 6: Exemplo de arquivo "xml" que define a rede.

```
<nodes>
  <node id="1" x="100.0" y="50.0" />
  <node id="2" x="100.0" y="150.0" />
  <node id="3" x="200.0" y="50.0" />
</nodes>
<types>
  <type="a" priority="3" numLanes="4" speed="70" />
  <type="b" priority="2" numLanes="2" speed="40" />
</types>
<edges>
  <edge id="via1" from="1" to="2" type="a" />
  <edge id="via2" from="3" to="1" type="b" />
</edges>
<connections>
  <connection from="via2" to="via1" fromLane="1" toLane="1" />
  <connection from="via2" to="via1" fromLane="1" toLane="2" />
  <connection from="via2" to="via1" fromLane="2" toLane="3" />
  <connection from="via2" to="via1" fromLane="2" toLane="4" />
</connections>
```

Fonte: (VAN HAARE HEIJMEIJER, 2016)

O arquivo de rotas inclui informações sobre as características físicas dos veículos, os itinerários que os veículos podem tomar e as condições de sua inserção (instante de tempo, localização etc.) na simulação. A primeira parte define os diferentes tipos de veículos que podem ser usados no modelo, tais como carros e ônibus. Esses podem ser especificados pela aceleração (*accel*), desaceleração (*decel*), tamanho (*length*), velocidade máxima (*maxSpeed*), a cor (*color*). Todos os atributos relacionados a velocidade são calculados em metros por segundo (m/s). A partir da Figura 7, podem-se observar os atributos necessários para a criação das rotas, onde se deve informar a sequência de vias pelas quais a rota é composta (*edges*). Além disso, principalmente no que tange ao transporte público, a rota deverá apresentar locais de parada (*stop*), definido por qual faixa o veículo estacionará e até quando permanecerá estacionado (*until*). Os veículos podem ser criados individualmente ou através de um fluxo (*flow*) de carros. Os veículos individuais são compostos por um tipo (*type*), qual a rota a ser seguida (*route*), momento de partida (*depart*) e uma cor específica (*color*). Na definição de um fluxo de veículos, deve constar o instante de início (*begin*), o período de inserção no ambiente (*period*), a quantidade de veículos (*number*), a rota a qual o fluxo pertence (*route*) e a posição a qual os carros são inseridos na rota (*departPos*) (LOPEZ *et al.*, 2018).

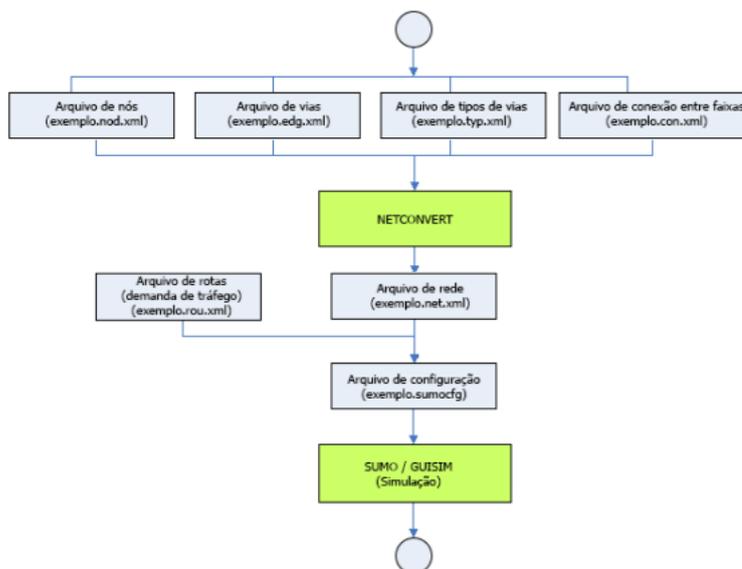
Figura 7: Exemplo de arquivo “xml” que define as rotas.

```
<routes>
  <vType id="type1" accel="0.8" decel="4.5" sigma="0.5" length="5"
  maxSpeed="70" color="1,1,0" />
  <route id="route0" edges="inicio meio fim" />
  <route id="route0_estacionamento" edges="inicio meio fim">
    <stop lane="meio_0" until="100" parking="false"/>
  </route>
  <vehicle id="0" type="type1" route="route0" depart="0" color="1,0,0" />
  <flow begin="0" departPos="free" id="carRight" period="1" number="70"
  route="routeRight" type="car" />
</routes>
```

Fonte: (VAN HAARE HEIJMEIJER, 2016)

O SUMO possui uma ferramenta denominada NETCONVERT, a qual é usada para transformar os arquivos de nós, vias, tipos e conexões em uma rede pronta para receber fluxos de veículos. A partir do arquivo de redes e de rotas é gerado um arquivo de configuração utilizado como entrada, como mostra a Figura 8.

Figura 8: Estrutura da simulação no SUMO

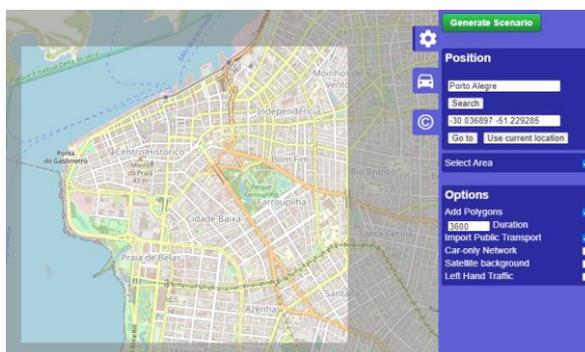


Fonte: (VAN HAARE HEIJMEIJER, 2016)

Além das principais aplicações (sumo, sumo-gui, netconvert etc.), podem-se utilizar ferramentas adicionais de análise de rede de tráfego, geração de demanda, e uma delas é o OSM Web Wizard. O OSM Web Wizard é essencialmente uma coleção de scripts Python obtidos junto com a instalação do SUMO. Esse script abre um navegador da web e permite selecionar uma região geográfica em um mapa. Ele também fornece alguns controles para especificar a demanda de tráfego aleatória para diferentes modos de tráfego.

Ao clicar no botão *Generate Scenario*, a rede de simulação para a área selecionada é construída com base em dados OSM (*Open Street Maps*), a demanda aleatória é gerada e o sumo-gui é iniciado. Dessa forma, os arquivos de rotas, de rede, de demanda e outros adicionais, são criados automaticamente (LOPEZ *et al.*, 2018). A partir da Figura 9, pode-se ter uma visão geral da ferramenta.

Figura 9: Captura do osmWebWizard.py



Fonte: Autor

Uma vez gerado o cenário, a simulação está pronta para ser iniciada. O arquivo de rede necessitará provavelmente de ajustes, visto que pode apresentar erros de conexões, de semáforos entre outros, mas um cenário de partida é obtido facilmente (Figura 10).

Figura 10: Captura do sumo-gui em execução com informações de rede e rotas baixadas automaticamente pelo OSM WebWizard.



Fonte: Autor

3.4 Estrutura geral da interligação entre SUMO e Python

Como já elucidado anteriormente, o TraCI permite o controle do SUMO por uma ferramenta externa. A ferramenta utilizada neste trabalho foi o Python, ou seja, através do Python e com intermédio do TraCI pode-se inicializar o SUMO, coletar informações a cada instante de tempo durante sua execução, e ao final, utilizar essas informações, por exemplo, num contexto de otimização. O esquema da Figura 11 ilustra essa interação.

Figura 11: Esquema Python, TraCI, SUMO



Fonte: Autor

Uma vez iniciada a simulação, o TraCI controlará a simulação e poderá obter informações sobre os mais diversos tipos de objetos. Para cada instante de tempo (sendo padrão de 1s) o TraCI irá realizar os comandos especificados na IDE (do inglês, *integrated development environment*) Python. Por exemplo, informações sobre todos os veículos na simulação podem ser obtidas, como: distância percorrida, velocidade, consumo de combustível e/ ou de eletricidade e emissões instantâneas, tempo de espera, entre outros. Na Figura 12, é apresentando um exemplo de linhas de código implementado no Python, onde o comando “traci.start(sumoCmd)” inicia a Simulação. Em seguida, o laço “while” determina a quantidade de instantes de tempo que serão percorridos, nesse caso, a simulação dura o tempo em que o número de veículos esperados a passar pela simulação seja maior que zero, ou seja, o TraCI permanecerá aberto enquanto houver veículos previstos a deixar a simulação. E finalmente, o comando “traci.close()” finaliza a interação entre SUMO e Python.

Figura 12: Exemplo de código do controle do SUMO no Python, através de TraCI

```
traci.start(sumoCmd)

while traci.simulation.getMinExpectedNumber() > 0:
    #Define o instante de tempo (se não informado, como é o caso, assume o padrão 1s)
    traci.simulationStep()

    #Adquire a lista dos veículos na simulação
    vehicles=traci.vehicle.getIDList()

    #Laço de obtenção de informações sobre os veículos na simulação no instante de tempo
    for i in range(0,len(vehicles)):
        vehid = vehicles[i]
        spd = round(traci.vehicle.getSpeed(vehicles[i])*3.6,2)
        edge = traci.vehicle.getRoadID(vehicles[i])
        lane = traci.vehicle.getLaneID(vehicles[i])
        displacement = round(traci.vehicle.getDistance(vehicles[i]),2)
        emissions = round(traci.vehicle.getCO2Emission(vehicles[i]), 2)
        #Organização dos dados para posterior exportação em CSV/XLSX
        vehList = [vehid, spd, edge, lane, displacement, emissions]

        #Pacote de dados simulados
        packBigDataLine = flatten_list([vehList])
        packBigData.append(packBigDataLine)

traci.close()
```

Fonte: Autor

Como é possível observar a partir da Figura 12, a recuperação de valores pelo TraCI, se obtém a partir de funções no formato `traci.object.getinformation()`. O objeto pode ser a simulação (*simulation*), veículo (*vehicle*), pessoa (*person*), etc. E a informação pode ser velocidade (*speed*), via (*edge*), emissões de CO2 (*CO2emission*) etc.

3.5 Cenários de simulação

Nesta seção, as hipóteses gerais utilizadas nas simulações e uma descrição detalhada dos cenários são apresentadas.

3.5.1 Hipóteses Gerais

Algumas hipóteses gerais são consideradas para as simulações realizadas:

- Os cenários são realizados considerando o trajeto Centro-Bairro entre 16 e 20h;
- Não foi considerado trânsito misto, ou seja, os únicos veículos inseridos na simulação são aqueles que compõem as linhas de ônibus de cada cenário;
- Passageiros entram somente no centro e saem no destino, ou seja, nas demais paradas os veículos param e verificando que não há passageiros partem em 20 segundos;
- Os ônibus saem da simulação uma vez terminada sua rota (não circulam em direção ao centro);
- O funcionamento dos semáforos foi obtido por meio do OSM Web Wizard, juntamente com a rede de tráfego;
- O modelo de emissões é o próprio modelo do SUMO, baseado no HBEFA (LOPEZ *et al.*, 2018);

- O cenário base considera ônibus padrão e articulados com capacidade máxima de 80 e 125 passageiros, respectivamente, informação que consta no ANEXO B;
- O cenário proposto considera apenas ônibus articulados com capacidade máxima de 150 passageiros;
- Fatores de correção são aplicados de acordo com a quantidade de passageiros em cada ônibus, conforme o estudo de PELKMANS; DE KEUKELEERE; LENAERS, (2001), onde um aumento de massa de 25% leva a um aumento médio de emissões de CO₂ de 15% para um ônibus a diesel;
- Na determinação desses fatores, a massa do passageiro em um ônibus urbano é de 70 kg;
- Os fatores estão indicados no Quadro 6 e são aplicados nas simulações de acordo com o tamanho de cada ônibus.

Quadro 6: Fatores de correção de acordo com a taxa de ocupação dos 3 tipos de ônibus utilizados neste trabalho.

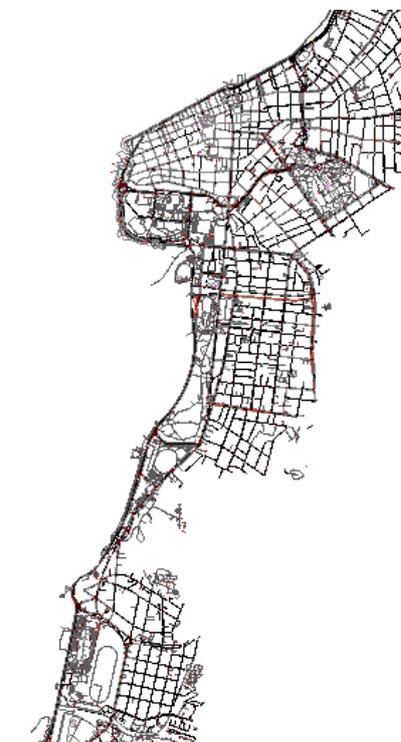
Tipo de ônibus	Capacidade Máxima	Tara (kg)	Peso Bruto Máximo (PBT) (kg)	Acrésc. Massa (%)	Acrésc. Emissões (%)	Fator de acréscimo por passageiro
Ônibus Padrão	80	10400	16000	53,85	31,23	0,003904
Ônibus Articulado Atual	125	17250	26000	50,72	29,42	0,002354
Ônibus Articulado BRT	150	19500	30000	53,85	31,23	0,002082

Fonte: (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2007)

3.5.2 Cenário de Base

O cenário de base simulado representa o caso atual, considerando o número de passageiros transportados por cada linha (Quadro 5) o horário de partida dos ônibus de cada linha (ANEXO B). A rede de tráfego obtida a partir do OSM Web Wizard pode ser observada na Figura 13.

Figura 13: Rede de tráfego, obtida através do OSM Web Wizard



Fonte: Autor

A partir da Figura 14 observa-se o mapa com as linhas de ônibus sendo de maior espessura os trechos com maior número de linhas.

Figura 14: Esquema ilustrativo das linhas de ônibus analisadas

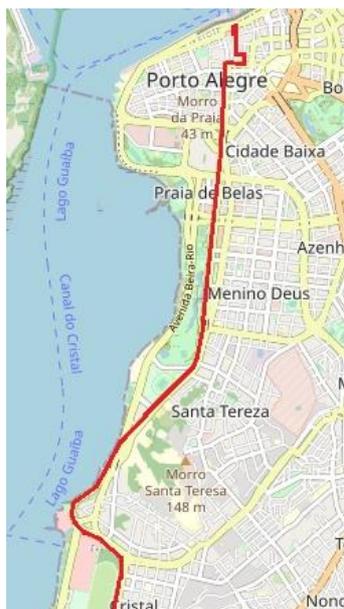


Fonte: Autor

3.5.3 Cenário Proposto

O cenário proposto consiste em uma única linha de ônibus de tipo BRT com capacidade máxima de 150 passageiros, que transportará todos os passageiros que seriam transportados pelas linhas do cenário de base. A rede de tráfego utilizada é a mesma do cenário de base, isto é, o conjunto de ruas e semáforos é o mesmo obtido através do OSM Web Wizard. O trajeto proposto inicia em frente ao Mercado Público e termina no mesmo local do cenário de base, e pode ser observado a partir da Figura 15.

Figura 15: Esquema ilustrativo das linhas, e simulação no SUMO



Fonte: Autor

Com a utilização de ônibus maiores, a mesma quantidade de passageiros pode ser transportadas com menos veículos. Sabendo disso, o objetivo da metodologia proposta é saber qual o momento de partida dos ônibus e a quantidade de veículos, respeitando a condição imposta pela demanda, buscando minimizar as emissões totais de CO₂. Nas subseções seguintes, apresenta-se a função objetivo, o algoritmo de otimização utilizado e uma implementação detalhada da metodologia.

- **Função Objetivo**

A otimização de uma linha de ônibus é um problema de MOO, visto que diversos aspectos devem ser considerados: eficiência do transporte e satisfação de passageiros (tempo de espera, tempo de viagem, preço da tarifa etc.), custo de operação, impacto com relação aos outros modais de transporte, missões de gases do efeito estufa e poluentes, gerando impactos locais e globais, entre outros. Neste estudo, porém, apenas dois aspectos foram levados em conta, devido ao limite computacional. Dessa forma, o problema estudado neste trabalho busca minimizar as emissões geradas pelos ônibus, garantindo que a demanda de passageiros seja atendida. De uma forma geral, este problema se configura como um Problema de Programação Não Linear e pode ser definido por:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } f(x) &= eE(x) + pP(x), \\ \text{sujeito a } x &\in \mathbb{R}^n, \end{aligned} \tag{3.1}$$

onde:

- x representa os horários de partida dos ônibus;
- $E(x)$ é o total de emissões de CO₂ geradas pelos ônibus que passam pela simulação;
- $P(x)$ é o número de pessoas que não foram atendidas, ou seja, aquelas que não chegaram ao destino;
- e e p são valores utilizados a fim de determinar os pesos relativos de cada objetivo

- **Algoritmo de Otimização**

O algoritmo de otimização utilizado nesse trabalho é o método simplex para minimização de funções desenvolvido por (NELDER; MEAD, 1965), conhecido por Nelder-Mead. Retomando a ideia da equação, o objetivo é minimizar a função $f(x)$ onde $x \in \mathbb{R}^n$. Considerando os pontos x_1, \dots, x_{n+1} , e os coeficientes ρ, χ, γ e σ (respectivamente, de reflexão, expansão, contração e redução), uma iteração de Nelder-Mead ocorre como a seguir (LAGARIAS *et al.*, 1998):

- 1) **Ordenação:** Ordenar os vértices do simplex de maneira que $f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{n+1})$. Calcular o centroide dos n melhores pontos, $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$.
- 2) **Reflexão:** Calcular o ponto de reflexão $x_r = (1 + \rho)\bar{x} - \rho x_{n+1}$. Se $f(x_1) \leq f(x_r) < f(x_n)$, aceitar o ponto x_r e terminar a equação.
- 3) **Expansão:** Se $f(x_r) < f(x_1)$, calcular o ponto de expansão $x_e = (1 + \rho\chi)\bar{x} - \rho\chi x_{n+1}$. Se $f(x_e) < f(x_r)$, aceitar x_e e terminar a iteração, caso contrário ($f(x_e) \geq f(x_r)$), aceitar x_r e terminar a iteração.
- 4) **Contração:** Se $f(x_r) \geq f(x_n)$, fazer uma contração:
 - a. Contração Externa: Se $f(x_n) \leq f(x_r) < f(x_{n+1})$, calcular $x_e = (1 + \rho\gamma)\bar{x} - \rho\gamma x_{n+1}$. Se $f(x_e) \leq f(x_r)$, aceitar x_e e terminar a iteração. Caso contrário, ir para o passo 5.
 - b. Contração Interna: Se $f(x_r) \geq f(x_{n+1})$, calcular $x_e = (1 + \rho\gamma)\bar{x} - \rho\gamma x_{n+1}$. Se $f(x_e) < f(x_{n+1})$, aceitar x_e e terminar a iteração. Caso contrário, ir para o passo 5.
- 5) **Redução (shrink):** Calcular os vetores $v_i = x_1 + \sigma(x_i - x_1), i = 2, \dots, n + 1$. Os vértices (ainda fora de ordem) para a próxima iteração são x_1, v_2, \dots, v_{n+1} .

A implementação do método Nelder-Mead é facilmente realizada a partir de Python a partir da biblioteca SciPy (VIRTANEN *et al.*, 2020). Esta biblioteca fornece a função minimize() que pode ser usada para aplicar vários métodos de otimização, dentre os quais o método Nelder-Mead.

- **Implementação da metodologia**

Para simulação no SUMO foram inseridos pessoas e veículos. Como pode-se observar a partir da Figura 16, as pessoas partem do círculo vermelho (abaixo na figura) e dirigem-se para a parada (em verde); já os ônibus partem do círculo vermelho (acima na figura). Os ônibus param em frente à parada (figura a direita) e os passageiros que aguardam na parada embarcam, e o ônibus segue em direção ao seu destino.

Figura 16: Ilustração dos locais de partida de pessoas e de ônibus e embarque de passageiros



Fonte: Autor

A inserção das pessoas na simulação se dá por fluxo enquanto os ônibus são iniciados individualmente o que permite que cada ônibus seja controlado separadamente. A simulação no simulador, começa no instante 0 segundos, que corresponde à 16h00. Por meio do Quadro 7 é possível observar o início e o término de cada fluxo de pessoas em horas, seu equivalente na simulação em segundos e a quantidade de pessoas inseridas por cada fluxo.

Quadro 7: Demanda horária de passageiros

Intervalo do fluxo de pessoas	Intervalo do fluxo equivalente na simulação	Quantidade de pessoas
16:00 – 16:30	0 - 1800	366
16:30 – 17:00	1800 - 3600	677
17:00 – 17:30	3600 - 5400	696
17:30 – 18:00	5400 - 7200	976
18:00 – 18:30	7200 - 9000	753
18:30 – 19:00	9000 - 10800	636
19:00 – 19:30	10800 - 12600	437
19:30 – 20:00	12600 - 14400	497
20:00 – 20:30	14400 - 16200	327

Fonte: Autor

Como pode-se observar no Quadro 8, a quantidade de passageiros a serem transportados é variável e apresenta um pico em torno das 17h30min. Dessa forma, o algoritmo deve encontrar uma solução ótima para o horário de partida de cada ônibus. Como a capacidade dos ônibus é de 150, conclui-se que um mínimo de 36 ônibus seriam necessários. Porém, para que o algoritmo decida a quantidade necessária de acordo com a demanda, um total de 48 veículos foi fornecido, espaçados em 400 segundos.

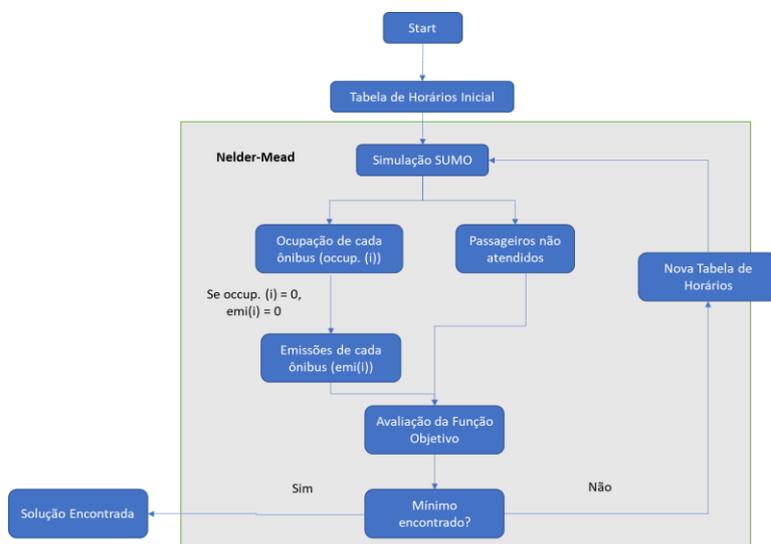
Quadro 8: Tabela de horários inicial, conjunto de $x \in \mathbb{R}^n$ utilizados no algoritmo Nelder-Mead.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
600	1000	1400	1800	2200	2600	3000	3400	3800	4200	4600	5000
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
5400	5800	6200	6600	7000	7400	7800	8200	8600	9000	9400	9800
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
10200	10600	11000	11400	11800	12200	12600	13000	13400	13800	14200	14600
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
15000	15400	15800	16200	16600	17000	17400	17800	18200	18600	19000	19400

Fonte: Autor

A lógica de implementação da metodologia é apresentada na Figura 17. A simulação recebe como os valores de $x \in \mathbb{R}^n$ como valor de entrada, conforme o Quadro 8.

Figura 17: Esquema da metodologia empregada



Fonte: Autor

- **Pesos relativos para cada objetivo**

O objetivo principal é a redução de emissões de CO₂ e o número de pessoas não atendidas é visto como uma penalidade. Os pesos relativos foram determinados por meio de “tentativa e erro”. O peso p foi mantido em 5, visto que para menores valores as soluções encontradas apresentam passageiros não transportados. Variou-se e de 3 a 5, a fim de observar a influência deste peso nos resultados.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos, começando pelo que foi constatado no cenário base e no cenário proposto.

4.1 Cenário de base

O cenário de base simulado representa o caso atual, abrangendo as linhas apresentadas no Quadro 5 e Quadro 7. Esta simulação foi importante para entender o comportamento atual da rede de ônibus, assim como o funcionamento geral dos parâmetros de entrada e saída do simulador. A Figura 18 ilustra o movimento de veículos ao longo da rede a partir de diferentes locais (em vermelho) na região central da cidade. Além disso, como as linhas têm uma frequência de partida não sincronizada, os ônibus de diferentes linhas circulam próximos uns dos outros, o que pode causar congestionamento, aumentando o tempo de viagem e as emissões de CO₂, devido às paradas e acelerações sucessivas. Fato que pode ser agravado com a adição do tráfego misto.

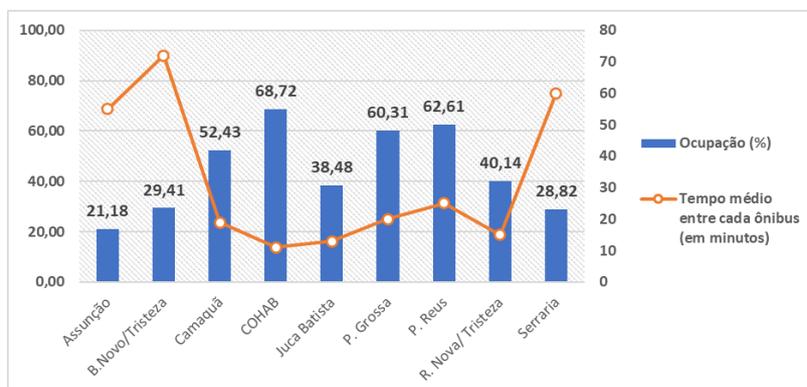
Figura 18: Simulação do caso real no SUMO (ônibus em amarelo e local de partida em vermelho)



Fonte: Autor

A Figura 19 compara o tempo médio entre a partida dos ônibus em cada rota e a ocupação média dos veículos. Pode-se ver que a taxa média de ocupação geral é baixa, e o tempo de espera para linhas com menor demanda é mais alto.

Figura 19: Tempo médio de espera em cada linha e a ocupação média dos ônibus



Fonte: Autor

O transporte público deve atender a população mesmo em intervalos com baixa demanda, mesmo que não seja uma viagem tão rentável para o operador. Porém linhas com taxa de ocupação de 20% em

horário de pico são um problema no quesito emissões de CO₂, pois veículos circulam (e, portanto, poluem) praticamente vazios. Dessa forma, é importante que uma reforma geral do transporte seja realizada, tornando as linhas mais eficientes e o transporte público mais atraente de forma geral.

4.2 Recursos computacionais e desempenho do algoritmo

Para a otimização do cenário proposto, utilizando o algoritmo Nelder-Mead, os seguintes recursos computacionais foram utilizados.

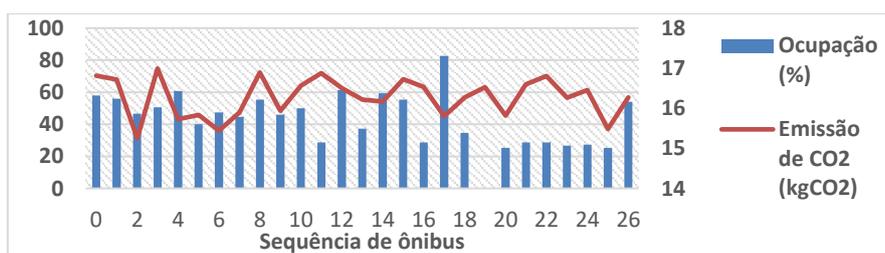
- Processador Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz
- 8 Gigabytes de memória RAM,
- SSD com capacidade de armazenamento de 128 Gigabytes
- e sistema operacional Windows 11 Home de 64 bits.

E o tempo de cada iteração do algoritmo foi de aproximadamente 60 segundos.

4.3 Cenário Proposto

Em primeiro lugar, antes de analisar o cenário proposto, vale a pena notar a razão para acrescentar os fatores de correção relacionados à ocupação do veículo. A Figura 20, mostra um dos primeiros resultados obtidos pelo algoritmo. Nota-se, que o algoritmo não discriminou ônibus vazios de cheios. Inclusive, a solução ótima foi encontrada sendo que o ônibus 19 circulou sem passageiros. Isso ocorre pelo fato de que o modelo de base do SUMO considera o mesmo padrão de emissões tanto para um ônibus cheio quanto para um ônibus vazio.

Figura 20: Ocupação e Emissões antes da implementação dos fatores de emissão e



Fonte: Autor

Conforme exposto na seção 3.5.3, a simulação do cenário proposto passou pela definição de uma nova linha partindo da região central da cidade, com ônibus maiores e com um trajeto alternativo (Figura 21).

Figura 21: Simulação do cenário proposto no SUMO



Fonte: Autor

Uma vez definida essa linha e sua demanda, a metodologia de otimização utilizando o algoritmo Nelder-Mead foi aplicada. Com a manutenção do peso $p = 5$, foi variado o peso e (referente às emissões totais) da função objetivo. Uma comparação entre os resultados obtidos é apresentada no Quadro 9.

Quadro 9: Resultados dos cenários

	Cenário de entrada	Cenário Proposto 1 ($e = 3, p = 5$)	Cenário Proposto 2 ($e = 4, p = 5$)	Cenário Proposto 3 ($e = 5, p = 5$)
Número de ônibus	41	39	39	39
Emissões (kgCO₂)	839,88	784,8	788,8	782,9
Redução de Emissões (%)	-	7,02	6,48	7,28
Ocupação média (%)	87,4	92,0	91,7	91,7
Tempo médio entre cada ônibus (min)	6,67	6,87	6,86	6,84

Fonte: Autor

A primeira constatação importante é que em todos os três cenários propostos o número de ônibus usados foi reduzido de 41 para 39. Além disso, a taxa média de ocupação aumentou de cerca de 87% para 92% e o tempo entre os ônibus aumentou.

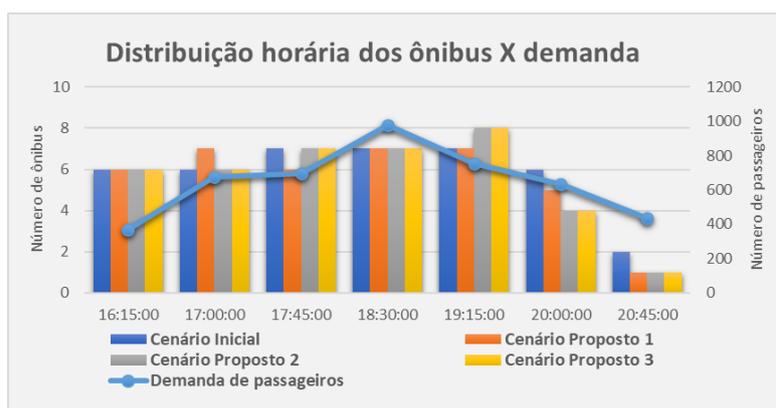
Quadro 10: Disposição temporal dos ônibus

Intervalo	Cenário Inicial	Cenário Proposto 1	Cenário Proposto 2	Cenário Proposto 3
16h até 16h45	6	6	6	6
16h45 até 17h30	6	7	6	6
17h30 até 18:15	7	6	7	7
18h15 até 19h	7	7	7	7
19h até 19h45	7	7	8	8
19h45 até 20:30	6	5	4	4
Após 20:30	2	1	1	1

Fonte: Autor

É possível observar por meio do Quadro 10 que o período entre 17h30 e 19h45 exige o maior número de ônibus, coerente com o pico de demanda, explicitado a partir da Figura 22.

Figura 22: Distribuição horária dos ônibus comparada com a da demanda.



Fonte: Autor

Finalmente, observa-se que o algoritmo convergiu para soluções ótimas, mas a ocupação máxima não foi obtida. Isto pode ser devido à presença de várias soluções ótimas locais. O algoritmo Nelder-Mead tende a funcionar razoavelmente bem para problemas que não têm muitos mínimos locais. Entretanto, não é um verdadeiro algoritmo de otimização local. No caso do problema tratado neste trabalho, a falta de conhecimento da forma da função e, conseqüentemente, a falta de conhecimento da existência, quanto mais da localização, dos mínimos locais pode levar o algoritmo a obter diferentes soluções ótimas. A solução poderia ser aperfeiçoada com a utilização de um algoritmo global acoplado com o Nelder-Mead (LUERSEN; LE RICHE, 2004).

4.4 Comparação com o cenário de base

Finalmente, o Quadro 11 apresenta uma comparação entre o cenário de base e os cenários propostos.

Quadro 11: Comparação entre todos os cenários simulados

	Cenário de base	Cenário de entrada	Cenário Proposto 1 (e = 3, p = 5)	Cenário Proposto 2 (e = 4, p = 5)	Cenário Proposto 3 (e = 5, p = 5)
Número de ônibus	102	41	39	39	39
Emissões (kgCO₂)	1715,9	839,88	784,8	788,8	782,9
Ocupação (%)	50	87,4	92,0	91,7	91,7

Fonte: Autor

A análise do cenário de base é interessante, primeiramente por ficar nítida a grande utilização de veículos, que apresentam uma taxa de ocupação bem baixa, mesmo em horários de pico. Neste caso, a adaptação do tamanho do veículo à demanda, poderia melhorar a taxa de ocupação. Os resultados obtidos para o cenário base são ilustrativos, visto que aspectos importantes não foram levados em conta, a saber, o tráfego misto. No caso de simulação da operação de veículos articulados do sistema BRT, é aceitável a não utilização do tráfego misto, visto que os veículos operam em via exclusiva. Além disso, a concepção do sistema BRT prevê a priorização dos semáforos aos veículos trafegando nos corredores BRT, o que pode reduzir ainda mais as emissões, diminuindo a frequência de aceleração e frenagem.

5 CONCLUSÃO

A mobilidade urbana é uma questão crucial hoje, e o será ainda mais nos próximos anos. Ela é definida como a capacidade das pessoas de se locomoverem no espaço urbano por razões econômicas, sociais e pessoais. E em um contexto de crescimento desenfreado das grandes cidades, o seu impacto ambiental tem sido cada vez mais analisado. No sentido de reduzir os impactos climáticos da mobilidade nas grandes cidades, este trabalho propôs uma metodologia de otimização de linhas de ônibus para fins de redução de emissões de CO₂.

O objetivo inicial deste estudo foi simular no SUMO uma linha de ônibus que transporta pessoas de um lugar para outro e avaliar a quantidade de emissões emitidas durante esta viagem. Uma vez definida a rede, foi desenvolvida uma ferramenta em Python que permite controlar a simulação, alterar parâmetros e coletar informações, através da biblioteca TraCI. Dessa forma, foi possível determinar o horário de partida de cada ônibus. E o passo final foi a implementação do algoritmo Nelder-Mead, com o objetivo de definir um cronograma que minimize as emissões de CO₂, respeitando a demanda de transporte fornecida. Em comparação com a tabela inicial fornecida, o número de ônibus utilizado foi reduzido e a taxa de ocupação aumentada de 87% para 92%, o que resultou em uma redução nas emissões de CO₂ em aproximadamente 7%. A redução obtida nesse tipo de análise é limitada, o que sugere que mudanças significativas podem ser obtidas mais no âmbito da troca de tecnologia por outras mais eficientes (veículos híbridos ou elétricos), ou ainda na migração para o transporte público de usuários de veículos individuais. É importante reforçar, entretanto, que a demanda pelo sistema ônibus depende de quão satisfatório é o serviço. Neste caso o tempo de viagem (incluindo o tempo de espera na parada) é um fator fundamental.

Este trabalho abordou alguns aspectos envolvidos na operação de sistemas de transporte público, simulação e otimização de tráfego, no entanto, ainda há muitos aspectos a serem analisados. Quanto à simulação de tráfego, aspectos como a adição de tráfego misto, semáforos preferenciais para o BRT, modelos de emissões mais precisos, entre outros. Quanto à otimização, um melhor estudo dos algoritmos globais e locais, e a comparação entre seus resultados poderia acrescentar ainda mais ao tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEHRISCH, Michael; KRAJZEWICZ, Daniel; WEBER, Melanie (org.). **Simulation of Urban Mobility**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. v. 8594
- BRASIL *et al.* **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 5ªed. Brasília: [s. n.], 2020.
- CALVO, T.; MESIAR, R.; YAGER, R.R. Quantitative Weights and Aggregation. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 62–69, 2004.
- CHEN, Qun. Global Optimization for Bus Line Timetable Setting Problem. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, [s. l.], v. 2014, p. 1–9, 2014.
- COELLO COELLO, Carlos A. A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques. **Knowledge and Information Systems**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 269–308, 1999.
- COELLO COELLO, Carlos; LAMONT, Gary B.; VAN VELDHUIZEN, David A. **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**. Boston, MA: Springer US, 2007.
- DALLMEYER, Jörg; TIMM, Ingo J. **MAINSIM – Multimodal INnercity SIMulation**. Frankfurt: [s. n.], 2012.
- DANTAS, Renata *et al.* Performance evaluation in BRT systems: An analysis to predict the BRT systems planning. **Case Studies on Transport Policy**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 1141–1150, 2021.
- DE FREITAS, Clarisse. **BRT vai transformar o sistema de transporte público de Porto Alegre**. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/noticias/1924/brt-vai-transformar-o-sistema-de-transporte-publico-de-porto-alegre.html>. Acesso em: 28 set. 2022.
- DEB, K. *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.
- DREIER, Dennis *et al.* Well-to-Wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 58, p. 122–138, 2018.
- EMTA. **Barometer of Public Transport in European Metropolitan Areas**. [S. l.: s. n.], 2022.
- EPTC. **TABELA HORÁRIA DE ÔNIBUS - DIAS ÚTEIS**. [S. l.], 2022a.
- EPTC. **Total de Passageiros Transportados**. Porto Alegre, Brasil: [s. n.], 2022b.
- FAN, Wei; MACHEMEHL, Randy B. Optimal Transit Route Network Design Problem with Variable Transit Demand: Genetic Algorithm Approach. **Journal of Transportation Engineering**, [s. l.], v. 132, n. 1, p. 40–51, 2006.
- FONSECA, C.M.; FLEMING, P.J. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. *Em:* , 1993. **Proceedings of the Proceedings of the ICGA-93: Fifth International Conference on Genetic Algorithms**. [S. l.: s. n.], 1993.
- GKIOTSALITIS, Konstantinos. Bus Scheduling with Evolutionary Optimization. [s. l.], 2020.
- HARTMANN TOLIĆ, Ivana; NYARKO, Emmanuel Karlo; CEDER, Avishai (Avi). Optimization of Public Transport Services to Minimize Passengers' Waiting Times and Maximize Vehicles' Occupancy Ratios. **Electronics**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 360, 2020.
- HAUSBERGER, Stefan; KRAJZEWICZ, Daniel. **COLOMBO Deliverable 4.2: Extended Simulation Tool PHEM coupled to SUMO with User Guide**. [S. l.: s. n.], 2014.
- HULTÉN, Jonas. **A survey of Transport Simulation Tools - Comparing free tools for simulating autonomous vehicles in traffic and logistics networks**. 2019. Tese de Mestrado - Chalmers University of Technology and University of Gothenburg, Gothenburg, 2019.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- IPEA. **ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis**. [S. l.]: INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2019.
- JOUMARD, Robert. Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the art: Action COST 319 final report. *Em: ACTION COST 319 FINAL REPORT*. [S. l.: s. n.], 1999.
- KALLE, RITESH KUMAR *et al.* SIMULATION-DRIVEN OPTIMIZATION OF URBAN BUS TRANSPORT. *Em:* , 2019. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 97–108.

- KOPPISETTI, M Venkateswararao; KAVITHA, Veeraruna; AYESTA, Urtzi. Bus schedule for optimal bus bunching and waiting times. *Em:* , 2018. **2018 10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)**. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 607–612.
- KRAJZEWICZ, Daniel *et al.* **Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility**. Berlin: [s. n.], 2012.
- KRAJZEWICZ, Daniel *et al.* Second Generation of Pollutant Emission Models for SUMO. *Em: [S. l.: s. n.]*, 2015. p. 203–221.
- KRAJZEWICZ, D., *et al.* SUMO (Simulation of Urban MObility)-an open-source traffic simulation. *Em:* , 2002. **Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling. MESM20002**. [S. l.: s. n.], 2002.
- LAGARIAS, Jeffrey C. *et al.* Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions. **SIAM Journal on Optimization**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 112–147, 1998.
- LEONIDAS NTZIACHRISTOS; ZISSIS SAMARAS. **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019**. [S. l.: s. n.], 2021.
- LINDAU, Luis Antonio *et al.* **Developing bus rapid transit systems in brazil through public private partnerships**. [S. l.: s. n.], 2007.
- LIORA, Natalia *et al.* Estimating Road Transport Pollutant Emissions Under Traffic-Congested Conditions with an Integrated Modelling Tool—Emissions Reduction Scenarios Analysis. **Emission Control Science and Technology**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 137–152, 2021.
- LOPEZ, Pablo Alvarez *et al.* Microscopic Traffic Simulation using SUMO. *Em:* , 2018. **2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 2575–2582. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8569938/>.
- LUERSEN, Marco A.; LE RICHE, Rodolphe. Globalized Nelder–Mead method for engineering optimization. **Computers & Structures**, [s. l.], v. 82, n. 23–26, p. 2251–2260, 2004.
- MEHTA, Vivek Kumar; DASGUPTA, Bhaskar. A Multi-objective Optimization Method Based on Nelder–Mead Simplex Search Method. *Em: [S. l.: s. n.]*, 2020. p. 655–668.
- MO, Songsong *et al.* Bus Frequency Optimization: When Waiting Time Matters in User Satisfaction. [s. l.], 2020.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. **The Computer Journal**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 308–313, 1965.
- NGATCHOU, P.; ZAREI, A.; EL-SHARKAWI, A. Pareto Multi Objective Optimization. *Em:* , 2006. **Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems**. [S. l.]: IEEE, 2006. p. 84–91.
- NGUYEN, Johannes *et al.* An overview of agent-based traffic simulators. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, [s. l.], v. 12, p. 100486, 2021. Disponível em: Acesso em: 30 jun. 2022.
- NITZKE, Leonardo de Moura. **Contratos de outorga do serviços de transporte coletivo municipal por ônibus: uma análise do caso de Porto Alegre**. 2015. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- NOTTER, Benedikt; COX, Brian. **HBEFA 4.2 Documentation of updates**. Bern: [s. n.], 2022.
- OLMO, Neide Regina Simoes *et al.* A review of low-level air pollution and adverse effects on human health: implications for epidemiological studies and public policy. **Clinics**, [s. l.], v. 66, n. 4, p. 681–690, 2011.
- ORLANDO, Victoria M. *et al.* An inverse bilevel equilibrium problem for public transport demand estimation. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 13–18, 2021.
- PANOVSKI, Dancho. **Simulation, optimization and visualization of transportation data**. 2020. Tese de Doutorado - Institut Polytechnique de Paris, Evry, 2020.
- PELKMANS, L.; DE KEUKELEERE, D.; LENAERS, G. **Emissions and fuel consumption of natural gas powered city buses versus diesel buses in realcity traffic**. [S. l.: s. n.], 2001.
- PÉRES, Matias *et al.* Multiobjective evolutionary optimization of traffic flow and pollution in Montevideo, Uruguay. **Applied Soft Computing**, [s. l.], v. 70, p. 472–485, 2018.

- PORTO ALEGRE. **LEI Nº 12.813, DE 3 DE MARÇO DE 2021**. Porto Alegre: [s. n.], 2021. Disponível em: https://dopaonlineupload.procempa.com.br/dopaonlineupload/3862_ce_316272_1.pdf. Acesso em: 29 ago. 2022.
- PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. **Diagnóstico da mobilidade no município de Porto Alegre e sua interface metropolitana**. [S. l.: s. n.], 2017.
- PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. **Mapa do sistema de BRT (Bus Rapid Transit) de Porto Alegre**. [S. l.], 2010. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/mapas/44/projeto-do-sistema-de-brt-de-porto-alegre.html>. Acesso em: 27 set. 2022.
- PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Manual dos Padrões Técnicos de Veículos**. [S. l.: s. n.], 2007.
- QUAASSDORFF, Christina *et al.* Comparison of microscale traffic emission models for urban networks. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 17, n. 9, p. 094030, 2022.
- REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Manual BRT Bus Rapid Transit - Guia de Planejamento**. Brasília: [s. n.], 2008.
- RIO GRANDE DO SUL. Plano Integrado de Transporte e Mobilidade Urbana - PITMurb. *Em: GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL; MINISTÉRIO DAS CIDADES; MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE (org.). Relatório Síntese*. Porto Alegre: METROPLAN, 2009. v. 16.
- ROCHA, Guilherme. **Demanda de Passageiros**. [S. l.: s. n.], 2022.
- ROMERO, Carlos. A general structure of achievement function for a goal programming model. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 153, n. 3, p. 675–686, 2004.
- RUPPRECHT CONSULT. **GUIDELINES FOR DEVELOPING AND IMPLEMENTING A SUSTAINABLE URBAN MOBILITY PLAN**. [S. l.: s. n.], 2019.
- SAN FRANCISCO TRANSPORTATION SECTOR CLIMATE ACTION STRATEGY. . San Francisco: [s. n.], 2017.
- SILVA, Vasco D.; FINAMORE, Anna; HENRIQUES, Rui. On the Role of Multi-Objective Optimization to the Transit Network Design Problem. [s. l.], 2022.
- SIMOB/ANTP. **Relatório geral 2018**. [S. l.: s. n.], 2020.
- SINGH, Amita *et al.* Optimizing local and global objectives for sustainable mobility in urban areas. **Journal of Urban Mobility**, [s. l.], v. 2, p. 100012, 2022.
- SPILIOPOULOU, Anastasia *et al.* Macroscopic Traffic Flow Model Calibration Using Different Optimization Algorithms. **Transportation Research Procedia**, [s. l.], v. 6, p. 144–157, 2015.
- SRINIVAS, N.; DEB, Kalyanmoy. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. **Evolutionary Computation**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 221–248, 1994.
- SUN, Ji-yang *et al.* Flexible Bus Route Optimization Scheduling Model. **Advances in Civil Engineering**, [s. l.], v. 2021, p. 1–13, 2021.
- TESSITORE, M.L. *et al.* A simulation-optimization framework for traffic disturbance recovery in metro systems. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [s. l.], v. 136, p. 103525, 2022.
- VAN HAARE HEIJMEIJER, ALEXIS. **INTERLIGAÇÃO ENTRE A FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO SUMO E O PROJETO MAPS**. 2016. BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Ponta Grossa, 2016.
- VIRTANEN, Pauli *et al.* SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 261–272, 2020.
- VRBANIC, Filip *et al.* Influence of Variable Speed Limit Control on Fuel and Electric Energy Consumption, and Exhaust Gas Emissions in Mixed Traffic Flows. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 932, 2022.
- ZHAO, Yifei *et al.* Improving Motorway Mobility and Environmental Performance via Vehicle Trajectory Data-Based Control. **IEEE Access**, [s. l.], v. 8, p. 86862–86869, 2020.
- ZITZLER, Eckart; DEB, Kalyanmoy; THIELE, Lothar. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results. **Evolutionary Computation**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 173–195, 2000.

ANEXO A - MAPA DE FISCALIZAÇÃO – DEMANDA DE PASSAGEIROS

Veículo	Linha	Chegada	DEMANDA	Veículo	Linha	Chegada	DEMANDA
	165	06:01	57	1217	171	08:10	35
	173	06:03	44	2187	165	08:10	35
1108	171	06:15	55	2231	110	08:12	60
1103	189	06:16	35	1106	189	08:16	56
1117	184	06:18	35	2371	188	08:19	25
2136	165	06:18	40	1059	171	08:20	56
2498	173	06:25	40	2192	165	08:20	66
2160	165	06:28	40	1021	173	08:20	61
1119	176	06:29	10	1177	184	08:21	66
2371	188	06:29	10	2411	110	08:22	55
1008	171	06:30	30	2416	110	08:32	50
2298	168	06:32	45	1119	176	08:33	25
2408	110	06:33	50	2495	184	08:33	20
1177	184	06:35	35	2150	165	08:33	71
1106	189	06:36	40	1108	171	08:35	50
2131	165	06:38	51	1197	189	08:36	56
2104	R81	06:40	66	1051	173	08:40	51
2490	111	06:45	50	2412	110	08:42	30
1021	173	06:45	25	1019	184	08:45	15
1135	110	06:48	30	2229	165	08:46	76
2187	165	06:48	56	2118	165	08:54	61
1164	171	06:50	35	1136	110	08:55	25
1019	184	06:50	47	1008	171	08:55	51
1197	189	06:56	56	2433	189	08:56	25
2192	165	06:58	61	1131	184	08:57	30
1140	171	07:00	55	2499	173	09:00	30
2409	111	07:05	40	2359	188	09:03	15
2495	184	07:05	51	2490	111	09:05	45
1051	173	07:05	30	2136	165	09:06	25
1068	110	07:12	60	1041	184	09:09	10
2150	165	07:12	71	2234	110	09:10	50
2433	189	07:16	61	1164	171	09:15	30
2359	188	07:16	30	1068	110	09:16	40
1131	184	07:17	51	2446	173	09:18	71
1199	171	07:20	25	2160	165	09:18	66
2499	173	07:20	61	1074	184	09:21	25
1066	110	07:22	50	1023	189	09:26	30
2229	165	07:22	76	2194	165	09:30	56
1158	184	07:27	35	1211	110	09:31	45
1005	171	07:30	25	1062	176	09:33	25
2118	165	07:30	66	1163	184	09:33	51
1045	110	07:32	45	2438	173	09:38	24
2488	111	07:33	50	1140	171	09:40	50
1062	176	07:35	20	2187	165	09:42	35
1023	189	07:36	40	1125	184	09:45	51
1163	184	07:37	25	2399	110	09:48	40
2136	165	07:38	76	2192	165	09:54	40
2209	R1	07:39	71	1103	189	09:55	20
1221	171	07:40	51	2444	184	09:57	20
2446	173	07:40	71	1021	173	09:58	30
2494	110	07:42	50	2371	188	09:59	10
2132	165	07:46	61	1199	171	10:00	25
1125	184	07:47	64	2229	165	10:06	30
1071	111	07:48	25	1117	184	10:09	35
1063	171	07:50	35	2135	110	10:18	20
2402	110	07:52	50	2118	165	10:18	30
2160	165	07:54	76	1221	184	10:21	40
1103	189	07:56	40	1051	173	10:23	25
2444	184	07:57	35	1197	189	10:25	20
1205	171	08:00	55		171	10:30	27
2438	173	08:00	56		165	10:30	57
2131	165	08:02	61		176	10:31	18
1117	184	08:09	66				

Fonte: Adaptado de (ROCHA, 2022)

ANEXO B – TABELA DE HORÁRIOS DAS LINHAS DE ÔNIBUS

Horário	Linha	Tipo	Capacidade	Horário	Linha	Tipo	Capacidade
16:00	110	Art	125	17:44	184	APD	80
16:00	176	-	80	17:50	165	APD Art	125
16:04	165	APD	80	17:50	173	-	80
16:08	184	-	80	17:52	110	Art	125
16:10	173	-	80	17:55	171	-	80
16:10	188	-	80	17:56	184	-	80
16:15	110	APD Art	125	18:00	165	APD	80
16:15	168	APD	80	18:00	176	-	80
16:16	165	APD Art	125	18:05	110	-	80
16:20	171	Art	125	18:05	173	APD	80
16:20	184	-	80	18:05	188	-	80
16:20	189	APD	80	18:06	189	APD	80
16:28	165	APD	80	18:08	184	-	80
16:30	110	Art	125	18:10	165	APD	80
16:30	173	APD	80	18:20	110	-	80
16:32	184	APD	80	18:20	165	APD	80
16:40	165	APD	80	18:20	171	APD	80
16:40	171	-	80	18:20	184	APD	80
16:42	110	Art	125	18:25	173	APD	80
16:44	184	-	80	18:29	189	-	80
16:50	165	APD Art	125	18:30	165	APD	80
16:50	173	APD	80	18:32	184	APD	80
16:50	189	-	80	18:40	110	Art	125
16:54	110	Art	125	18:40	165	APD	80
16:55	171	Art	125	18:45	171	Art	125
16:56	184	APD	80	18:45	173	-	80
17:00	165	APD	80	18:45	184	-	80
17:00	176	-	80	18:52	165	APD Art	125
17:05	173	-	80	18:52	189	-	80
17:05	188	-	80	19:00	176	-	80
17:06	110	Art	125	19:00	184	APD	80
17:08	165	APD	80	19:04	165	APD	80
17:08	184	-	80	19:05	110	Art	125
17:10	171	-	80	19:05	168	-	80
17:16	165	APD Art	125	19:05	188	-	80
17:20	110	-	80	19:10	173	-	80
17:20	168	-	80	19:13	171	-	80
17:20	173	-	80	19:15	184	APD Art	125
17:20	184	APD	80	19:15	189	-	80
17:20	189	-	80	19:16	165	APD	80
17:24	165	APD	80	19:30	165	APD	80
17:25	171	-	80	19:30	184	APD	80
17:28	110	Art	125	19:35	173	APD	80
17:32	165	APD	80	19:38	189	-	80
17:32	184	APD	80	19:40	110	Art	125
17:35	173	-	80	19:43	171	-	80
17:36	110	-	80	19:50	165	APD	80
17:40	165	APD	80	19:50	168	-	80
17:40	171	-	80	19:50	184	-	80
17:43	189	-	80	19:50	188	-	80
17:44	110	-	80	19:55	173	APD	80

Fonte: Adaptado de (EPTC, 2022a)

ANEXO C – INFORMAÇÕES SOBRE BRT

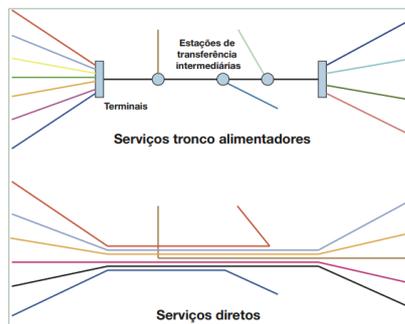
Os sistemas *Bus Rapid Transit* (BRT) surgiram na América Latina como uma inovação que poderia transformar as cidades e a forma como as pessoas se movimentam. O BRT é um sistema de ônibus de alta capacidade que oferece um serviço rápido, confiável e eficiente, com investimentos menores do que as tecnologias ferroviárias (como o metrô), sendo mais acessíveis às cidades de países emergentes. No Brasil, o primeiro BRT surgiu em Curitiba e tem sido utilizado como modelo para o desenvolvimento de sistemas similares por todo o mundo (LINDAU et al., 2007).

Uma rede tipo BRT deve ser pensada como um sistema, ou seja, a equipe responsável pelo planejamento deve se ater ao seu funcionamento como um todo. Em suma, um sistema BRT apresenta as seguintes características (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2008):

- Linhas tronco-alimentadoras
- Corredores dedicados para a circulação do transporte coletivo;
- Embarque e desembarque no mesmo nível dos veículos, tornando o processo mais rápido;
- Sistema de pré-pagamento de tarifa;
- Veículos de alta capacidade, modernos e com tecnologias mais limpas;
- Transferência entre rotas sem incidência de custo;
- Integração com outros modais de transporte;
- Priorização semafórica;
- Informação em tempo real ao usuário;
- Acessibilidade universal.

Uma das características mais notáveis do sistema de BRT é o funcionamento a partir de linhas tronco-alimentadoras, em oposição a linhas diretas Figura 23.

Figura 23: Serviços tronco-alimentadores e serviços diretos



Fonte: Manual BRT (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2008)

Como o nome implica, “serviços diretos” levam o passageiro direto de uma área residencial por um corredor principal. Os veículos comumente operam em faixas exclusivas nas áreas centrais onde a demanda é maior. Nas outras partes da linha, o veículo pode e deve operar em faixas compartilhadas com tráfego geral (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2008).

Serviços tronco-alimentadores utilizam veículos menores em áreas de baixa densidade e veículos maiores ao longo de corredores em áreas de alta densidade. Os veículos menores, portanto, “alimentam” os corredores “troncais” maiores. Nesse tipo de sistema, uma parte dos passageiros necessitará realizar transferências, principalmente, daqueles que percorrem grandes distâncias (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2008).